

文章编号: 1673- 9620 (2008) 01- 0055- 04

轨道交通的虚坡模型^{*}

薛国新

(江苏工业学院 信息科学与工程学院, 江苏 常州 213164)

摘要: 建立准确有效的列车行驶的计算机仿真模型, 对于优化轨道交通管理, 具有十分重要的意义。以往在此方面已做了较多的研究工作, 但尚存不足之处。主要表现在对于寻找一种能自动满足列车运动约束条件的时空大范围列车运行方案方面尚未给予足够重视。元胞自动机模型被用于模拟公路车辆的行驶, 但这类模型对于轨道交通问题, 难以严格满足约束条件。为此将公路交通车辆行驶中的超车跟车虚坡模型推广应用于轨道交通, 通过引入假想道路宽度参数, 得到了一种轨道交通的虚坡模型。假定每一列车或站台尾部有一假想尾巴 (或称虚坡, 或称假想 S 形斑马线), 通过它来表示当前列车或站台对于后方列车的减速作用。对一个实例进行了设计计算。结果表明该模型是有效的。

关键词: 轨道交通; 超车模型; 跟车模型; 虚坡

中图分类号: TP 391.9 **文献标识码:** A

Virtual Slope Model Proposed for Railway Traffic

XU E Guo-xin

(School of Information Science and Engineering, Jiangsu Polytechnic University, Changzhou 213164, China)

Abstract: The creation of valid and accurate computer simulation models for running trains is significant for the optimal management of railway traffic. A lot of research work has been done in this field. But there are still some shortcomings. Sufficient attention has not been paid to the finding of a running program which would automatically satisfy constraint conditions in a large extent. Cellular automaton model has been used for the simulation of running cars. But this kind of model has difficulties in strictly satisfying constraint conditions. This paper extends the car-overtaking and car-following virtual slope model to the case of railway traffic. An imaginable road width is introduced. In this way a virtual slope model for railway traffic is proposed. Each train and station has an imaginable trail or an imaginable slope (or imaginable S-zebra line) which would slow down the following trains. A real example was checked with the virtual slope model. The results showed that it is valid.

Key words: railway traffic; overtaking; car-following; virtual slope

通过计算机手段对轨道交通进行模拟, 可以了解列车调度的各种可能方案, 在不同的方案之间进行比较, 从而得到较优的列车运行控制方案。此外, 有效的列车仿真手段是分析铁路交通流量的

基础。人们在轨道交通的计算机仿真方面已做了大量的工作, 已有多种通用列车运行模拟软件相继问世^[1,2], 在牵引模型^[3]和轨道的通行能力及列车的延误时间模型方面^[4]有了许多研究成果。但是, 对

* 收稿日期: 2007- 07- 16

作者简介: 薛国新 (1962-), 男, 江苏武进人, 研究员。

于完全从运动学出发,寻找一种能自动满足列车运动约束条件的时空大范围列车运行方案方面尚存在较多不足之处。在轨道交通仿真方面,传统方法的工艺路线实际上是从寻找合适的或较优的列车运行调度方案开始,列车行驶的具体过程的仿真则是面向指定的调度方案而分段进行的,在此基础上用概率论方法研究列车延误时间。列车调度方案主要是使用离散数学规划的方法给出。这类方法通过数学规划算法,寻找出可行的列车运行时刻表,对于指定路段,将时间分成若干片,每辆列车占用一定数量的连续时间片。根据道路阻力等因素建立列车行驶的牵引计算模型,以此模型为基础结合控制算法,对列车速度实行分段控制,由此确保列车遵守指定的时刻表。这种方法其实是从系统宏观计算的角度入手的。其缺点是,不是采用一种连续的分析方法,由局部模型去生成系统整体的时间和空间状况。因此,也就难以在电脑上生成各种可能的状态。

人们使用元胞自动机方法^[5,6]对车辆的行驶进行模拟计算。但对于列车行驶而言,使用元胞自动机方法至少有如下不足之处: ①需将道路人为地划分为一定长度的单元格;同时这种方法在时间上也是离散的; ④由于模型的离散性,导致不能保证有关约束条件得到严格意义下满足,影响列车调度方案的制订; ④元胞自动机模型无论是在时间上还是空间上,离散划分的长度带有很大的主观性。上述原因导致元胞自动机模型不能很好地用于轨道交通的仿真以及列车调度方案的制订。为此提出使用虚坡模型^[7]对列车的行驶进行仿真研究。其工艺路线与传统方法正好相反。它着眼于从寻找一种列车的自动行驶仿真模型开始,各辆列车必须满足运动约束条件,在指定站台必须停车时间必须达到最小的指定值,各辆列车以尽可能快的速度行驶,在任意时刻,列车的行驶速度必须能由其所处的局部环境确定。

1 轨道交通的虚坡模型

与汽车行驶的仿真相比,轨道交通仿真问题有其许多独特之处。在大多情况下,列车轨道属于单车道。但在车站附近,列车既可向车站驶入,又可不作停顿向前直行。这种情况与汽车行驶的双车道或多车道情形又完全不同。目标是设计一种连续的数学模型,使得列车行驶的约束条件能自动得到满足。

超车仅在车站附近发生,即只有普快或直快在车站附近对于停于车站内轨道中的慢车进行超车,或者只有直快对于停于车站内轨道中的普快或慢车进行超车。其余情形均视为跟车状态。所以,对于轨道交通的情形,可以推广公路交通超车跟车虚坡模型^[7](或称假想尾巴模型^[8]或无格子模型^[9]),且对于跟车情形可认为满足单车道条件。公安交通管理部门常在接近桥梁或窄道口处画一种特殊的斑马线,从整体上看它根部平,头部尖;其边界外形呈S形弯曲,并与固支梁挠度曲线半支形状大致相似。所谓的虚坡其实就是一种假想的附着于车辆尾部的运动着的S形斑马线,它不代表一种实际存在,但作为一种辅助几何图形,参与模型计算。即虚坡模型又可称为假想S形斑马线模型。公路和轨道交通过程同属车辆行驶过程,很自然两者有共同的内在机理,寻找一种新颖方法,统一表示这种内在机理,具有重要意义。轨道交通过程中车辆虽不能发生像公路交通中的那种超车,但与公路交通过程中的跟车过程很相似,而跟车过程又可看作为超车过程的一种极限情况。根据这一思想,将引入假想道路宽度参数,由此将虚坡模型或假想S形斑马线模型推广用于轨道交通的仿真计算。

假定每个列车尾部有一假想的虚坡,其纵向长度为 l 。其横向宽度为

$$t = w_0 \left[3 \left(\frac{\zeta}{l} \right)^2 - 2 \left(\frac{\zeta}{l} \right)^3 \right] \quad (1)$$

其中, w_0 为列车宽度, ζ 为虚坡上点到虚坡尾端的距离。同理,假定每一站台有一虚坡,虚坡的根部位于车站轨道的中点,虚坡尾部指向列车运行的反方向,其宽度仍如上式所示。

考虑3种类型的列车: ①直达快车; ④普通快车; ④慢车。直达快车自起点站开出后中途不停靠任何车站,直至到达终点站方才停下;普通快车途中只在各大站停车;而慢车每站皆停。每个车站上,有一专用于慢车停靠的轨道。每一大站,有一专用于普快停靠的轨道。在途中各站慢车停靠轨道的中央,有一虚坡根部,该虚坡指向列车行驶反方向。在途中各大站普快停靠轨道的中央,也有一虚坡根部,该虚坡指向列车行驶反方向。在终点站某一假想的停车位置,也有一虚坡根部,该虚坡尾部指向列车行驶反方向。

有关车站的慢车轨道虚坡、普快轨道虚坡及终点站虚坡是静态的。即虚坡的形状大小及位置恒定不变,各列车尾部的虚坡形状大小不变,但其位置

跟随对应列车的位置变化。对于进站车，各车站轨道虚坡对于进站车的减速作用仿佛一辆停于站台内假想静止列车一样。

将所有列车连同假想的静止列车编上序号。任一列车的轨道是确定的。在任意时刻，对于任一列车，找出其紧邻的前方列车，称其为当前列车的前导列车。将前导列车的速度记作为 v_{lead} ，令当前列车到前导列车尾部的距离为 ζ ，虚坡长度为 l 。这里虚坡长度要取得足够大使得当前导列车突然产生故障而停车时，后方列车要能来得及制动而免于发生碰撞。分两种情形。

情形¹ $\zeta > l$ 。这时，前导列车尚未构成对所考虑列车的减速作用。而所考虑列车的速度由当前速度按固支梁挠度曲线模型^[10-15]向着其最大速度逼近。其算式为

$$v_j = v_j^{(0)} - (v_j^{(0)} - v_j^{max}) \left\{ 1 - \left[3 \left(1 - \frac{t - \tau_0}{T_R} \right)^2 - 2 \left(1 - \frac{t - \tau_0}{T_R} \right)^3 \right] \right\} \quad (2)$$

其中 j 为当前列车编号， τ_0 为某一分水岭时刻，从这一时刻开始，所考虑的列车到其前导列车虚坡尾端的距离开始大于 l 。 $v_j^{(0)}$ 为所考虑列车在上述分水岭时刻的速度，称作为分水岭速度。 v_j^{max} 为所考虑列车的最大速度。 T_R 为特征时间，表示列车速度由分水岭速度恢复到其最大速度所需的过程时间。

情形² $\zeta \leq l$ 。这时，先用下式算出列车一个目标速度值

$$v_j = v_j^{max} (1 - c_j) + c_j v_{lead} \quad (3)$$

其中 v_{lead} 为前导列车的动态变化的实时速度， c_j 为插值系数，它由下式算出

$$c_j = \min \left[\frac{t_j}{w_{road} - w_{train}}, 1 \right] \quad (4)$$

其中 t_j 为列车的虚坡横向宽度， w_{road} 为假想的道路宽度， w_{train} 为列车宽度。注意，尽管列车是在轨道在运行的，这里却假想它是在有一定宽度的道路上运行的。这里 $w_{train} < w_{road} < 2w_{train}$ ，又 t_j 的取值范围从 0 变至 w_{train} 。用下式算出列车的实际速度值。

$$v_j = v_j^{(0)} - (v_j^{(0)} - v_j) \left\{ 1 - \left[3 \left(1 - \frac{t - \tau_0}{T_R} \right)^2 - 2 \left(1 - \frac{t - \tau_0}{T_R} \right)^3 \right] \right\} \quad (5)$$

这里 τ_0 为某一分水岭时刻， $v_j^{(0)}$ 为所考虑的当前列车的速度。从这一时刻起，所考虑列车具有新的前导列车。前导列车也可以是假想的停于车站内的

列车（用以模拟列车进站的减速行为）。

与公路交通的情形相比，前导列车的确定算法不同。在公路交通的情形下，同时依据车辆的纵向位置排序和相对车速来确定哪一车辆为当前所考虑车辆的前导车，只有比当前车辆速度为慢的车辆才有可能当作前导车。而对于轨道交通的情形，只在较早出发的列车集和前方假想静止列车集（对应于车站对列车的减速作用）中寻找与其距离最近者作为前导列车，在确定前导列车时并不考虑前方列车与当前列车的相对速度。只要前方列车（含假想静止列车）的虚坡尾端触及当前列车，就认为此前方列车为可能的前导列车。当然，仅在这些可能的前导列车中选出虚坡尾端到当前车最近者作为真正的前导列车。

2 应用实例

考虑 4 辆列车。它们顺次为直快，普快，慢车和普快。各车从起点站出发的时间分别为 0 时，0 时 4 分，0 时 8 分，0 时 12 分和 0 时 16 分。各车的最大速度均为 $300 \text{ km/h} \approx 83.3 \text{ m/s}$ 。各车加速减速过程中所允许的最大加速度的绝对值为 $0.5g = 4.9 \text{ m/s}^2$ 。包括起点站和终点站在内共有 30 个车站。它们离起点的距离如表 1 所示。

表 1 各车站距离
Table 1 Positions of the railway stations

站号	0 起点站	1 小站	2 小站	3 小站	4 大站	5 小站
距离	0	15	30	45	60	70
站号	6 小站	7 大站	8 小站	9 小站	10 大站	11 小站
距离	80	90	103	116	130	140
站号	12 小站	13 大站	14 小站	15 小站	16 大站	17 小站
距离	150	160	177	194	210	220
站号	18 小站	19 大站	20 小站	21 小站	22 终点站	
距离	230	240	250	260	270	

所有直快在中间各站均不停，所有普快途中只在大站停靠，所有慢车在各站均停靠。停车时间一般均为 4 min，但慢车在小站停车 3 min。在各大站处有一普快进站弯曲轨道，其形状如一固支梁挠度曲线，其跨长为 1 000 m，对应的最大挠度为 100 m，故该弯曲部分的轨道长度为 1 023.6 m。用上述计算模型，得到各车的到站和发车时刻如下：直快 0 时从起点出发，于 3 274 s 到达终点站；1 号列车（普快）的各站到发时间顺次为：[0] (-, 240), [4] (977, 1 217), [7] (1 611, 1 851), [10] (2 366, 2 606), [13] (3 000, 3 240), [16] (3 874, 4 114), [19] (4 509, 4 749), [22] (5 143, -)。

这里,方括号中数目表示车站序号,圆括号中的一对数目顺次表示到站时间和出发时间。

2号列车(慢车)的各站到发时间顺次为:

[0] (-, 480), [1] (677, 857), [2] (1 071, 1 251), [3] (1 466, 1 646), [4] (1 860, 2 100), [5] (2 254, 2 434), [6] (2 589, 2 769), [7] (2 923, 3 163), [8] (3 353, 3 533), [9] (3 724, 3 904), [10] (4 105, 4 345), [11] (4 500, 4 680), [12] (4 834, 5 014), [13] (5 169, 5 409), [14] (5 647, 5 827), [15] (6 065, 6 245), [16] (6 472, 6 712), [17] (6 866, 7 046), [18] (7 200, 7 380), [19] (7 534, 7 774), [20] (7 929, 8 109), [21] (8 263, 8 443), [22] (8 597, -)。

3号列车(普快)的到发时间顺次为: [0]

(-, 720), [4] (1 457, 1 697), [7] (2 091, 2 331), [10] (2 846, 3 086), [13] (3 480, 3 720), [16] (4 354, 4 594), [19] (4 929, 5 229), [22] (5 623, -)。

3 总结

参见(4)式,当一辆快车向一辆前方慢车逼近时,由于起先虚坡宽度较小,导致较小(小于1),因而目标速度之值接近快车的最大速度。但在其尚未遇到前方慢车时,会提前变为1,从那以后快车的目标速度值为前导车的速度。

用虚坡模型对列车行驶进行计算,方法简洁有效,因此计算量十分有限,从而能执行快速的仿真模拟。该模型能连续地给出任意时刻各列车的位置,模型中列车的速度变化是连续的,故没有离散模型中速度跳跃的现象。同时它能准确体现前方列车和车站对于所考虑列车的减速作用,有关约束条件是自动满足的,实际上这意味着各列车的速度由其所处的局部环境直接决定,这就说明了为什么模型的计算具有较低的复杂性。

尽管列车是在轨道在运行的,上述虚坡模型中却假想它是在有一定宽度的道路上运行的。这样做的目的实质上在于同时体现本车惯性行为和前方车辆对后方车辆的逐渐减速行为。

用虚坡模型已能对公路交通中叉路口的交通流问题进行解耦计算,而与公路交通问题相比,轨道

交通问题在车站外一般表现为单车道的特点,故虚坡模型能顺利用于轨道交通问题并非偶然。

参考文献:

[1] 毛保华,何天键,袁振洲,等.通用列车运行模拟软件系统研究[J].铁道学报,2000,22(1):1-6

[2] 田长海,梁洪忠,黄民,等.列车动态模拟系统的研究[J].中国铁道科学,1995,16(1):14-25

[3] 石红国,彭其渊,郭寒英.城市轨道交通牵引计算机模型[J].交通运输工程学报,2005,5(4):20-26

[4] 徐瑞华,徐浩,宋键.城市交通列车共线运营的通过能力和延误[J].同济大学学报(自然科学版),2005,33(3):301-305

[5] Nagatani T. Kinetic clustering and jamming transitions in a car-following model for bus route [J]. Physica A, 2000, 287(1-2): 302-312

[6] Nagel K, Wagner P, Woesler R. Still flowing: approaches to traffic flow and traffic jam modeling [J]. Operations Research, 2003, 51(5): 681-710.

[7] 薛国新.车辆行驶的虚坡模型[J].机械强度,2007,29(2):341-345

[8] 薛国新.多车超车跟车假想尾巴模型[J].计算机仿真,2006,23(5):245-248.

[9] 薛国新.一种新的一维无格子超车跟车仿真模型[J].计算机仿真,2005,22(12):227-229

[10] 薛国新,顾怀中.用固支梁挠度曲线模拟高速路基本超车过程[J].力学与实践,2003,25(6):31-32

[11] 薛国新,顾怀中.高速公路交通流问题的分段固支梁挠度曲线模型[J].系统仿真学报,2003,15(12):1796-1798

[12] Guoxin Xue, Hongyuan Liu, Zhenghua Ma, et al. Simulation on moving vehicles on a highway by segmental fixed-end-beam model [A]. Wang Shunsheng, Lu Qin. Proceeding of the 9th Joint International Computer Conference, JICC 2003 [C]. Zhuhai: Zhuhai publishing house, 2003. 34-39

[13] Guoxin Xue, Zhenghua Ma, Huaizhong Gu. Simulation the basic overtaking process of a highway with the deflection curve of a fixed-end-beam [A]. Wang Shunsheng, Lu Qin. Proceeding of the 9th Joint International Computer Conference, JICC 2003 [C]. Zhuhai: Zhuhai publishing house, 2003. 308-310

[14] 薛国新.高速公路基本超车过程的推广固支梁挠度曲线模型[J].江苏工业学院学报,2005,17(2):7-8

[15] 薛国新.一种超车判别条件[J].计算机仿真,2006,23(12):267-271

[16] 薛国新,顾怀中.基于虚坡模型的交叉口交通流的解耦方法[J].江苏工业学院学报,2006,18(2):44-48